



TITLE:

運動の判断における動的情報の効果

AUTHOR(S):

廣瀬, 直哉

CITATION:

廣瀬, 直哉. 運動の判断における動的情報の効果. 京都大学大学院教育学研究科紀要 1999, 45: 110-122

ISSUE DATE:

1999-03-31

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/57342>

RIGHT:

運動の判断における動的情報の効果

廣 瀬 直 哉

Effects of Dynamic Information on Motion Judgments

HIROSE Naoya

問 題

人は、日常の中で様々な物理現象に出会っている。それらの物理現象を扱ったり、観察したりする中で、人はそれらについてどのような知識を獲得しているのだろうか。人は日常的な経験から、物理学における法則と同等の知識を獲得しているのだろうか。様々な物理現象についての知識に関するこれまでの研究からわかったことは、多くの分野で物理現象に関する問題の解答は、ある少数のパターンに分けることができるということである（例えば、Caramazza, McCloskey & Green, 1981）。つまり、人はランダムに答えているわけではなく、経験から物理現象に関してなんらかの法則性を見出していることになる。しかし、それらはいわゆる物理法則と必ずしも一致しているとは限らない。むしろ、誤った知識であることがしばしば指摘されている。こうした知識体系は、直観的物理学（intuitive physics）や素朴物理学（naïve physics）といった名前で呼ばれている。

素朴物理学に関する研究は、人工知能の研究領域で始まった。それまでの研究がエキスパートによる、明示的な形式のルールで記述された知識を主として扱っていたのに対し、素朴物理学の研究は、ナイーブな人に存在する知識を調べ、その知識の構造を解明することを目的としている。そこでは、跳ねるボール（Forbus, 1983）、ブザー（de Kleer & Brown, 1981）などに関するナイーブな人の知識が扱われている。ナイーブな人が持っている知識は、物理法則のように定量的ではなく、むしろ定性的なものであることが多い。こうした人の知識の定性的な側面に注目した研究が、定性推論（qualitative reasoning）と呼ばれる研究領域である。こうした知識は、フレームやプロダクション・システムといった知識表現では表すことができない。むしろ、こうした知識は、モデルのようなものだと考えられており、メンタル・モデルと呼ばれている（Gentner & Stevens, 1983）。

素朴物理学に関する心理学や教育の分野の研究では、ナイーブな人が持っている知識の不完全な側面、つまり、物理や科学の法則といかに異なっているかに焦点が置かれている。教育場面について考えると、例えば、力学を学ぶとき、生徒は全くの白紙状態で学ぶのではなく、すでに運動についての経験と実用的理解をある程度は持っている。現実世界での経験をもとにして、生徒は物理的世界について、自分なりの概念を発展させている。しかも、こうした概念は根強く、新

たな概念を学習する際に強い影響を与える。ところが、日常経験から獲得されるこうした概念は、学問的に誤っていることが少なくない。さらに、この誤った概念は、大学で物理学の教育を受けたあとでも、多くの学生に共有されていることが知られている（Clement, 1982など）。物理現象に関するこうした概念は、電流（Gentner & Gentner, 1983）、熱と温度（Wiser & Carey, 1983）、蒸発（Collins & Gentner, 1987）など、様々な分野で研究が行われているが、本研究では、落下運動に関する直落信念（straight-down belief）について取り上げる。

McCloskey, Washburn & Felch (1983) は、動いている運び手から落とされた物体が真下に落ちるという誤概念を直落信念と名付けた。McCloskey らの実験で用いられたのは、歩行者問題、コンベヤ問題、傾斜路問題の3種類の筆記型の問題である。歩行者問題は、一定の速さで歩いている歩行者がボールを放した後、ボールがどこに落ちるかを問う問題である。コンベヤ問題は、一定の速さで動いているコンベヤからボールを落とした時の軌跡を問う問題である。傾斜路問題は、傾斜路を転がってきたボールが崖から落ちる時の軌跡を問う問題である。これらの問題ではいずれも、ボールは落下前に前方に運動しているので、前方に放物線を描いて落下する。ところが、大学生を対象とした実験で、歩行者問題では49%、コンベヤ問題では23%もの被験者がボールは真下に落下すると答えたのである（これに対して、傾斜路問題では6%であった）。

McCloskey らは、この結果が筆記型の問題だけでなく、現実的な課題においても同様の結果であることを確かめている。McCloskey らの課題は、被験者に実際にボールを持って歩かせて、歩きながら、ターゲットに当たるようにボールを落とさせるというものであった。実験の結果、被験者の62%は、ターゲットの前でボールを放したが、33%はターゲットの真上でボールを放した。つまり、33%の者は、歩きながらボールを落とすと、落とした地点の真下に落ちると考えていたわけである。課題が現実化されることにより、課題の正答率が上がるという現象は問題解決研究においてよくみられることであるが、McCloskey らの実験結果からみると、直落信念では現実化の効果がみられないことになる。

さらに、Green, McCloskey & Caramazza (1985) は、動的視覚提示（dynamic visual display）による効果も否定している。具体的な実験データをあげてはいないが、Green らは、コンピュータ上で様々なボールの動的シミュレーションを被験者に見せる実験を行っている。運動の軌跡を動的に提示すると、物理的には不可能な運動も完全に信じられる（perfectly believable）ように見え、被験者の判断に全く影響を与えなかったとしている。

これに対して、直落信念を扱った研究ではないが、運動を動的に提示することにより、正しい軌跡の選択に効果があったとする研究もある。Kaiser, Proffitt & Anderson (1985) は、曲線運動力（curvilinear impetus）に関して動的提示の効果があったことを報告している。曲線運動力とは、水平面上に置いた螺旋状のチューブから投射されたボールが、外力が働いていなくても、カーブをした軌跡を描くという誤概念である（McCloskey, Caramazza & Green, 1980）。Kaiser らの実験では、被験者にビデオによる提示で、自然な軌跡と不自然な軌跡の弁別を行わせたところ、被験者は、運動なし条件に比べて、運動あり条件では自然な（正しい）直線の軌跡を選ぶことができた。さらに、この効果は成人（大学生）だけでなく、子ども（小学生）においてもみられた。このことから、不自然な（誤った）軌跡と自然な（正しい）軌跡の弁別に、運動の動的情報へのアクセスが有効であることが示唆された。

また、Shanon (1976) は、自由落下運動に関して動的提示の効果があることを明らかにした。Shanonの実験では、自由落下に関する筆記型の問題で、物体は等速に落下するという誤概念が20～50%もみられた。これに対して、落下運動を動的に提示した場合、等速運動を選択する者は7%しかいなかった。Shanon は、この結果を概念と知覚の乖離であると解釈している。

これらの実験結果が示唆していることは、力学法則に反する不自然な運動を認識することを可能にするような知覚的感受性を人が持っているということである (Kaiser, Proffitt & Anderson, 1985)。そこで、他の運動に関する問題でこうした動的提示の効果がみられたのなら、直落信念に対しても、同様の効果がみられるのではないだろうか。本研究の第1の目的は、この仮説を検討することである。このため、大学生を対象に、パーソナル・コンピュータによりディスプレイ上に運動の動的シミュレーションを提示し、動的提示による効果を検証する実験を行う(実験1)。

さらに、もし成人の被験者で動的提示の効果があるのなら、Kaiser らが明らかにしたように、子どもを被験者にしたときにおいても同様の効果がみられるかを調べることは興味深いことのように思われる。以前に力学を学んだことのある大学生は、運動の動的情報にアクセスすることで、自分が以前に学んだ知識を想起し、そのため正しい軌跡を選択することが出来るようになるかもしれない。そうすると、学校等で運動に関して学んでいない小学生に対しては動的提示の効果がないかもしれない。逆に、小学生に対しても効果があるとすれば、動的提示の効果は力学の知識等とは関係なく、より強固なものであることがわかる。そこで、小学生についても直落信念に対する動的提示の効果を検討する実験を行う(実験2)。

また、動的提示により直落を選択する反応が減少したとしても、軌跡を描く課題や描いた軌跡を選択する課題では、依然として直落信念がみられるであろう。では、直落信念は何が原因で生じているのだろうか。

Clement (1982) は、初等力学を学んでいる大学生に運動と力に関する問題を解かせ、“運動は力を含意する (Motion Implies a Force ; 以下 MIF)” という誤概念が広くみられることを見出した。MIF の典型的な例は、投げ上げられたコインに力を記入する問題において、コインの上昇中に上向きの力を記入するというものである。一見すると、上向きに力が働いているように思えるが、実際には上向きの力は存在せず、下向きの重力のみがコインには働いている (Clement の問題では空気抵抗は無視できるものとしているが、空気抵抗があったとしてもその力は下向きである)。学生はどうして実際には存在しない力を記入したのだろうか。ある学生は「速度は上向きだから、上向きに合力が働いているはずだ」と説明している。つまり、運動をしている物体には運動方向に力が働いていると考えているのである。Clement の研究では、力学のコースを受ける前後の学生を対象としており、受講前の正答率は12%、受講後の正答率は28%であり、力学のコースを終えた学生にも依然として高い割合で MIF がみられることを指摘している。これは MIF のような概念が従来の科学教育では変え難いことを示している。

以上のように、素朴物理学においては、運動の軌跡が力と密接に結びついている。このように考えると、MIF 概念は、直落信念と関連があるのではないかと思える。この可能性について検討し、直落信念の原因について考察することが、本研究の第2の目的である。

実 験 1

目 的

実験1の目的は、McCloskey ら (1983) が見出した直落信念に対する動的提示の効果を検討することである。そのため、CRTディスプレイ上で動いているいくつかの軌跡の中から正しいものを被験者を選択させる条件、および、静止した軌跡の中から選択させる条件の2つの条件を設定した。直落信念に対して動的提示の効果があるとすれば、静止した軌跡の選択において直落信念を示す者も、動的な軌跡の選択では正しい軌跡を選択することが予想される。もし直落信念の課題で動的提示の効果があるとすれば、他の類似する課題でも動的提示の効果があることが推測される。このため、振り子に関する落下運動の軌跡の課題も合わせて実施した。

また、力についての誤概念 (MIF) が直落信念に対して影響を与えているかもしれない。そこで、直落信念の原因について考察するため、物体に働いている力を被験者に問う課題を実施した。

方 法

被験者 文系学部に所属する大学生20名 (男子9名, 女子11名) を被験者とした。すべての被験者は高校において力学分野について学習していたが、大学において物理学等を履修した者はなかった。

装 置 パソコン (PC/AT 互換機), CRTディスプレイ (15インチ), マウス。

課 題 課題は、ディスプレイ上に提示されたいくつかの落下運動の軌跡の中から正しい軌跡を選ぶ課題 (以下, 軌跡課題), および, 落下前後に物体に働いている力を問う課題 (以下, 力課題) の2種類が実施された。

軌跡課題は、物体の落下運動の軌跡を問う課題であり、4つの問題のタイプ (転がる, 運ぶ, 振り子A, 振り子B) × 2つの提示条件 (動的, 静的) の計8題が実施された。

4つの問題の正答を、図1～4に示した。

転がる問題 (図1) は、水平でなめらかな台上を一定の速さで転がってきたボールが、落ちる軌跡を問う問題であった。これは、McCloskey (1983) の崖問題や McCloskey, Washburn & Felch (1983) の傾斜路問題と同じタイプの問題であった。運ぶ問題 (図2) は、アームによ

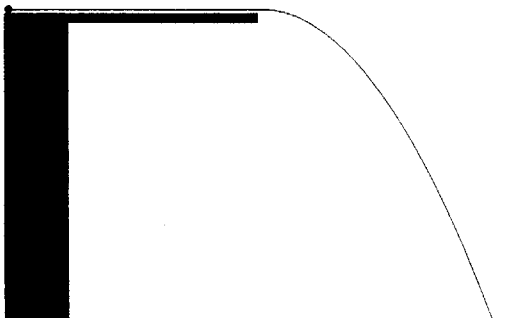
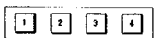


図1 転がる問題の正答 — 放物線

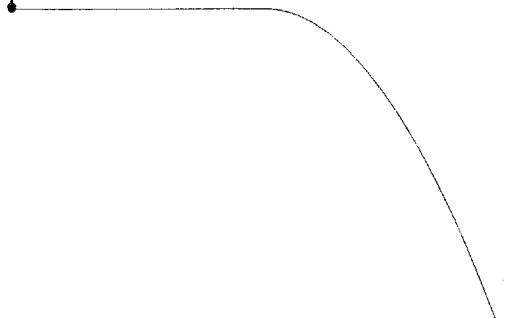
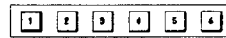


図2 運ぶ問題の正答 — 放物線

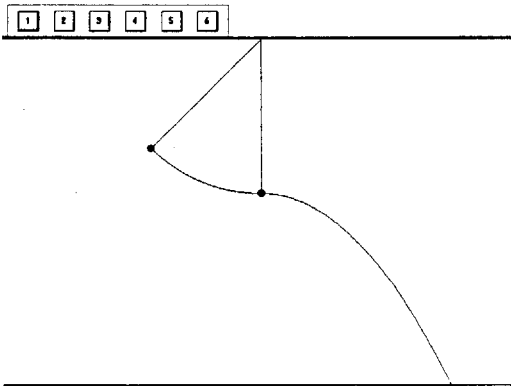


図3 振り子A問題の正答——放物線

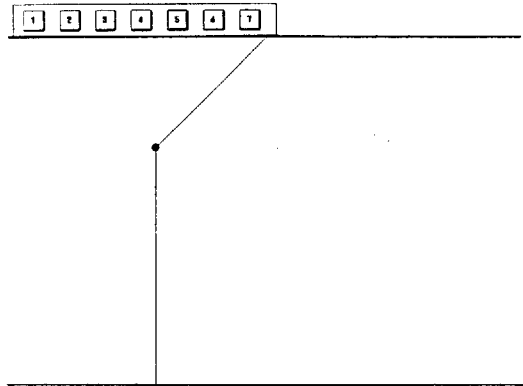


図4 振り子B問題の正答——直落

て一定の速さで運ばれてきたボールが矢印の地点で放された後、落ちる軌跡を問う問題であった。これは、McCloskey, Washburn & Felch (1983) が実施したコンベヤ問題と同じタイプの問題であった。振り子A問題(図3)と振り子B問題(図4)は、Caramazza, McCloskey & Green (1981) が実施した問題と同じタイプの問題であり、振り子A問題は、中間点振り子の糸が切れた後、ボールが落ちる軌跡を問う問題であった。また、振り子B問題は、左端で糸が切れた後に、ボールが落ちる軌跡を問う問題であった。振り子A問題は、転がる問題、運ぶ問題と同様に放物線の軌跡が正答となるため、いわゆる同型問題(isomorphic problems)と考えられる。しかし、振り子B問題は、左端でのボールの速度が0となるため、自由落下の軌跡が正答となり、他の問題とは同型ではない。このため、その他の課題と動的提示の効果が異なる可能性が予測される。

軌跡課題の提示条件は、静的提示と動的提示の2種類であった。静的提示条件は、ディスプレイ上に線で描かれたいくつかの運動の軌跡から、正しいものを選択するのに対して、動的提示条件は、ディスプレイ上を実際に動くいくつかのボールの運動から、正しいものを選択する課題であった。軌跡の選択肢の数は、問題のタイプによって異なっていた。転がる問題では、正答である放物線と直落の他に、先行研究で見られた斜線と逆L字型があり、選択肢の数は4つ(直落、放物線、斜線、逆L字)であった。運ぶ問題では、転がる問題と同様の4つの選択肢と、初速度の方向と逆方向に落下する放物線と斜線の2つを加えた6つの選択肢(直落、放物線、斜線、逆L字、放物線(逆)、斜線(逆))であった。振り子問題では、さらに、糸が切れた時の遠心力方向に落下する選択肢があり、選択肢の数は7つ(直落、放物線、斜線、逆L字、放物線(逆)、斜線(逆)、遠心力)であった。ただし、振り子B問題の静的提示条件では、直落と遠心力が同じ直線になるため、遠心力の選択肢は除かれた。

力課題は、軌跡課題と同じ4つの問題のタイプ(転がる、運ぶ、振り子A、振り子B)のそれぞれにおいて、落下前後に物体に働いている力を所定の用紙に記入する課題であった。摩擦や空気抵抗が無視できる場合、落下前には上方向の垂直抗力(または糸の張力)と下方向の重力が働いており、落下中は下方向の重力のみが働いていることになる。

シミュレーションの条件 転がる問題では、台から床までの距離2.4m、台の水平方向の距離2.0m、台上での水平方向の初速度2.5m/sになるように条件を設定した。この条件で床までの落

下時間は0.7秒であった。また、実際のディスプレイ上での縮尺は約1/15であった。他の軌跡の選択肢に関して、直落は自由落下運動であった。斜線は、等加速度の直線運動で、落下位置と落下時間が放物線の場合と同じになるように加速度を決めた。逆L字は、放物線での落下位置の2/3の水平位置になるまで減速し、その後自由落下するように設定した。運ぶ問題では、放物線と斜線の逆方向のものを左右反転した以外は、転がる問題と同じであった。

振り子問題では、糸の長さ0.7m、糸の支点から床までの距離1.6m、振り子の最大振れ角45°になるように条件を設定した。この条件で振り子の周期は1.7秒であり、2周期分往復した後、糸が切れて落下するようにした。また、実際のディスプレイ上での縮尺は約1/9であった。振り子A問題の軌跡の選択肢は、直落、放物線、斜線およびそれらの逆方向に関して、転がる問題、運ぶ問題と同様の条件であった。逆L字は、糸が切れた後も1/6周期だけ振り子の運動を続け、その後自由落下するようにした。遠心力は、遠心力方向に糸が切れた時点での初速度を持ち、重力の分だけ加速度を持つ運動になるようにした。振り子B問題では、糸が切れた時点では初速度0であるので、放物線と斜線で、糸の接線方向に、1/8周期前の速さを初速度として与えた。それ以外に関しては、振り子A問題と同様であった。

手続き 実験は、個別に行われた。課題は、軌跡課題の静的提示条件、動的提示条件、力課題の順に実施された。それぞれの課題内での問題の提示順序は、運ぶ問題、振り子B問題、振り子A問題、転がる問題の順であった。

軌跡課題では、まず被験者は、それぞれの問題の初期画面を見せられ、ディスプレイ上にあるボール、台、アーム、糸などについて説明を受け、必要となる数値（それぞれの長さや初速度）を教えられた。また、摩擦や空気抵抗は無視できることを教示された。さらに、被験者は、ディスプレイ上のボタンをマウスでクリックして、ボールが落下する前の初期運動を見ることができた。次に、被験者は、問題の画面を見せられ、ディスプレイ上に並んだボタンの一つを押すと、それぞれのボタンに対応した軌跡が静的条件では線として、また、動的条件ではアニメーションとして提示されるので、それらの中から正しい軌跡を選択するように教示された。ディスプレイ上のボタンは、最初は1から順番にしか押せないようになっているが、一通り全てのボタンを押して軌跡を見ると、その後は、ボタンを自由に何度でも押せるようになっていたので、被験者は正しい軌跡を選ぶまで、何度でも軌跡を見ることができた。軌跡のボタンの割り当ては被験者ごとにカウンターバランスされた。

力課題では、被験者は、それぞれの問題の初期画面を見せられ、ボールだけが書かれた用紙に、落下する直前にボールに働いている力と落下中の中間点でボールに働いている力を矢印で記入するように求められた。また、課題の後に、被験者はなぜそのような軌跡や力になるのか説明を求められた。

結果と考察

実験1の軌跡課題における被験者の選択を表1に示した。

最初に、正答率の分析を各提示条件ごとに行った。静的提示条件において正答率を比較すると、問題間で有意な差が見られた（CochranのQ検定、 $Q = 32.2$, $df = 3$, $p < .001$ ）。そこで、Ryan法による多重比較を行うと、振り子B問題と他の3つの問題（転がる、運ぶ、振り子A）間に有意な差が見られた（McNemar検定、それぞれ、 $p < .001$, $p < .05$, $p < .001$ ）。また、

表1 実験1の軌跡課題での被験者の選択 (n = 20)

問題	提示条件	直落	放物線	斜線	逆L字	放物線(逆)	斜線(逆)	遠心力
転がる	静的	0	20	0	0	—	—	—
	動的	0	19	1	0	—	—	—
運ぶ	静的	5	13	0	0	2	0	—
	動的	1	18	1	0	0	0	—
振り子A	静的	0	18	1	1	0	0	—
	動的	0	19	1	0	0	0	0
振り子B	静的	4	15	0	0	1	0	0
	動的	10	4	5	0	0	1	0

運ぶ問題と転がる問題の間に有意な差がみられ、運ぶ問題と振り子A問題の間に差がある傾向がみられた (McNemar 検定, それぞれ, $p < .05$, $p < .1$)。同様に、動的提示条件で正答率を比較すると、問題間で有意な差が見られた (Cochran の Q 検定, $Q = 18.0$, $df = 3$, $p < .001$)。そこで、Ryan 法による多重比較を行った結果、振り子B問題と他の3つの問題 (転がる、運ぶ、振り子A) 間に有意な差がみられた (McNemar 検定, それぞれ, $p < .001$, $p < .05$, $p < .001$)。これらの結果から、静的提示、動的提示の両条件で、4つの問題間では振り子B問題の正答率が他の3つの同型問題に比べて低く、さらに、静的提示条件では、3つの同型問題間では運ぶ問題の正答率が低いという結果になった。

次に、3つの同型問題 (転がる、運ぶ、振り子A) において直落反応の分析を行った。各問題のそれぞれの提示条件について比較すると、動的提示条件では問題間に差はみられなかったが、静的提示条件では問題間に有意な差がみられた (Cochran の Q 検定, $Q = 10.0$, $df = 2$, $p < .01$)。そこでさらに、静的提示条件で Ryan 法による多重比較を行ったところ、運ぶ問題と他の2つの問題間で直落反応に有意な差があった (McNemar 検定, いずれも, $p < .05$)。つまり、運ぶ問題は同型の他の問題に比べ、直落反応が多いというこれまでの先行研究と一致した結果が得られた。

さらに、直落信念に対する動的提示の効果についての分析を行った。動的提示の効果により、直落反応が減少し、正答率が増加しているかどうかを調べるために、運ぶ問題の静的提示条件と動的提示条件間で比較を行った。その結果、静的提示条件に比べて動的提示条件では、正答は増加し (McNemar 検定, $p < .05$)、逆に直落反応は減少する傾向にあった (McNemar 検定, $p < .1$)。このことから、運ぶ問題において動的提示の効果があることが示され、本研究の仮説が支持された。

また、他の問題においても、動的提示の効果があるかどうかを調べるために、静的提示条件と動的提示条件間で比較を行った。転がる問題、振り子A問題では、静的提示条件での正答率が高かったため、動的提示条件と比較しても、被験者の選択にほとんど変化がなかったが、振り子B問題では、静的提示条件でもっとも多い間違いであった放物線の選択が動的提示条件では減少し (McNemar 検定, $p < .001$)、正答である直落の選択の増加がみられた (McNemar 検定, $p < .02$)。また、斜線の選択も増加がみられた (McNemar 検定, $p < .05$)。これらの結果から、振り子B問題においても、なんらかの動的提示の影響があったと考えられる。

表2 実験1の力課題での力の向き (n = 20)

	問題	上+下	下	上+下+右(左)*	下+右(左)*	右(左)*	その他
落下前	転がる	3	0	9	1	6	1
	運ぶ	4	0	8	0	5	3
	振り子A	7	0	6	1	6	0
	振り子B	6	0	8	1	2	3
落下中	転がる	0	4	0	14	0	2
	運ぶ	0	6	0	12	0	2
	振り子A	0	5	0	12	0	3
	振り子B	0	11	0	8	0	1

*転がる、運ぶ、振り子A問題では落下前の進行方向が右向きであるので右であり、振り子B問題では落下前の進行方向が左向きであるので左である。

実験1の力課題における被験者の選択を表2に示した。

4つの問題間の正答に関する分析を行った結果、各問題を落下前、落下中で比較すると、落下前では差がみられなかったが、落下中では問題間の正答率に有意な差がみられた (Cochran の Q検定, $Q = 12.38$, $df = 3$, $p < .005$)。そこでさらに、落下中に関して Ryan 法による多重比較を行ったところ、振り子B問題と転がる問題の間に有意差がみられ (McNemar 検定, $p < .05$)、振り子B問題と運ぶ問題の間、振り子B問題と振り子A問題の間に差がある傾向がみられた (McNemar 検定, いずれも $p < .1$)。この結果から、振り子B問題は他の問題に比べて、落下中において、正答が多いことに示唆される。

これは、振り子B問題の正答が直落反応であったためだと考えられる。直落反応では、落下中の運動方向と重力方向が同じであるため、MIF 概念と重力は区別できない。したがって、みかけ上、正答率が高くなったものと考えられる。実際、すべての問題において正しい力を記入したものは、20名中わずか2名だけであり、他の18名はいずれかの問題で実際には存在しない運動方向に力を描いていた。また、その実際には存在しない運動方向の力に関して説明を求めると、進もうとする力、最初に与えられた力などと答えた者が、転がる問題で16名中10名、運ぶ問題で14名中9名、振り子A問題で15名中11名、振り子B問題で9名中6名いた。つまり、多くの被験者は MIF 概念を持っていたと推測される。

実 験 2

目 的

実験2の目的は、実験1で見られた動的情報提示の効果が、成人の被験者 (大学生) だけでなく、子どもにおいても同様に見られるかどうかを検討することである。

方 法

被験児 京都府下の公立小学校の6年生18名 (男子10名, 女子8名) を被験児とした。物体の運動に関する教科内容は未習であった。

装 置 実験1と同様であった。

課 題 軌跡課題は実験1と同様であった。力課題は、予備実験において被験児にとって困難であることがわかったので、実施しなかった。実験1と同様に、実験後に、それぞれの問題で、なぜそのような軌跡なるのかを説明させた。

手続き 実験1と同様であった。

結果と考察

実験2の軌跡課題における被験児の選択を表3に示した。

表3 実験2の軌跡課題での被験者の選択 (n = 18)

問題	提示条件	直落	放物線	斜線	逆L字	放物線(逆)	斜線(逆)	遠心力
転がる	静的	2	15	1	0	—	—	—
	動的	1	17	0	0	—	—	—
運ぶ	静的	7	7	2	0	0	2	—
	動的	2	11	2	2	0	1	—
振り子A	静的	2	14	1	0	0	1	—
	動的	1	14	2	0	1	0	0
振り子B	静的	2	12	2	0	2	0	0
	動的	4	5	7	0	0	1	1

まず最初に、各課題条件ごとに問題間で正答率の比較を行った。静的提示条件において正答率を比較すると、問題間に有意な差がみられた (Cochran のQ検定, $Q = 22.6$, $df = 3$, $p < .001$)。そこでさらに、Ryan 法による多重比較を行った結果、振り子B問題と転がる問題、振り子B問題と振り子A問題の間に有意な差がみられた (McNemar 検定, それぞれ, $p < .005$, $p < .01$)。また、運ぶ問題と転がる問題、運ぶ問題と振り子A問題の間に有意な差がみられた (McNemar 検定, それぞれ, $p < .05$, $p < .05$)。この結果は実験1とはほぼ同じ結果と考えられる。さらに、動的提示条件における正答率を比較すると、問題間に有意な差がみられ (Cochran のQ検定, $Q = 24.26$, $df = 3$, $p < .001$)、Ryan 法による多重比較を行った結果、振り子B問題と他の3つの問題 (転がる問題、運ぶ問題、振り子A問題) 間に有意な差がみられた (McNemar 検定, それぞれ, $p < .001$, $p < .05$, $p < .005$)。また、転がる問題と運ぶ問題の間に差がある傾向がみられた (McNemar 検定, $p < .1$)。これらの結果をみると、振り子B問題が他の問題より難しいことは実験1と同様であるが、運ぶ問題が転がる問題に比べて、正答率が低い傾向がみられたことから、小学生にとっては、運ぶ問題が動的提示であってもやや困難であったと推測される。

次に、表3の3つの同型問題 (転がる、運ぶ、振り子A) において直落反応の分析を行った。それぞれの課題条件別に比較すると、動的提示条件では問題間に差はみられなかったが、静的提示条件では問題間に有意な差がみられた (Cochran のQ検定, $Q = 7.14$, $df = 2$, $p < .05$)。そこでさらに、静的提示条件で、Ryan 法による多重比較を行ったところ、運ぶ問題と振り子A問題の間には差がみられなかったが (McNemar 検定, $p > .1$)、転がる問題と運ぶ問題の間で直落反応に有意な差があった (McNemar 検定, $p < .05$)。つまり、運ぶ問題は転がる問題に比べて直落反応が多いという結果が得られた。この結果は、実験1とも同様の結果であり、これまで

の先行研究と一致した結果である。

さらに、直落信念に対する動的提示の効果についての分析を行った。運ぶ問題において、直落反応が減少し、正答率が増加しているかどうかを調べるために、静的提示条件と動的提示条件間で比較を行った。その結果、静的提示条件に比べて動的提示条件では、直落反応は減少し (McNemar 検定, $p < .05$)、逆に正答は増加する傾向がある (McNemar 検定, $p < .1$) ことがわかった。つまり、小学生が被験者の時でも、実験 1 と同様の動的提示の効果が確認されたことになる。

また、他の問題においても、動的提示の効果があるかを調べるために、静的提示条件と動的提示条件間で比較を行った。転がる問題、振り子 A 問題では、動的提示の効果はみられなかった。振り子 B 問題では、静的提示条件でもっとも多い間違いであった放物線が、動的提示条件では減少している一方 (McNemar 検定, $p < .01$)、正答である直落の反応は増加しておらず、斜線の反応が増加している (McNemar 検定, $p < .05$)。静的提示条件に比べて動的提示条件で、放物線の選択が減少し、斜線の選択が増えたことは実験 1 でもみられたことであるが、小学生の場合は、放物線の選択の減少が必ずしも正答の増加につながっていないことがわかった。

総合的考察

本研究の第 1 の目的は、運動を動的に提示することにより、正しい運動を選択できるようになるという動的提示の効果が、直落信念に対してみられるかを検討することであった。このため、パーソナル・コンピュータによりディスプレイ上に、運動の動的シミュレーションを提示し、動的提示の効果を調べる実験を行った。実験結果より、運ぶ問題の動的提示条件で、直落反応の減少、および、正答率の増加がみられ、動的提示の効果が確かめられた。また、運ぶ問題と同型ではない振り子 B 問題においても、動的提示の効果がある可能性が示唆された。また、この効果は、大学生だけでなく小学生においても見られた。

では、直落信念に対して動的提示の効果があつたのはなぜであろうか。Kaiser, Proffitt & Anderson (1985) の主張は、人は自然な運動と不自然な運動を分けることができるような知覚的感受性をもっており、運動の動的情報が利用可能になることにより、この能力が発揮されるというものである。McCloskey et al. (1983) の実験で、パフォーマンス型課題の効果や動的な視覚提示の効果がみられなかったのは、被験者が運動の動的情報にアクセスできないような課題であったためであると推測される。これに対し、Kaiser, Proffitt & Anderson (1985) の実験、Shanon (1976) の実験、今回の実験では、運動の動的シミュレーションを提示することにより、被験者が運動の動的情報にアクセスできたため、正しい運動の軌跡を選択できたものと考えられる。

Kaiser, Proffitt, Whelan & Hecht (1992) は、力学の問題解決に対する動画の効果を詳細に検討している。Kaiser et al. (1992) は、3 つのタイプの問題に関して動画の効果を検討した研究から、質点の運動と剛体の運動では、動画の効果が異なることを報告している。質点の運動では、力学的な情報が 1 つの次元であるため、動画により、運動の状態について必要なすべての情報を提供され、動画の効果がみられるが、剛体の運動は、より高次元となるため、必要なすべて

の情報が提供されず、効果は見られないと結論づけている。本研究で扱った問題はすべて質点の運動の問題であるので、実験結果は Kaiser et al. (1992) の知見と一致している。

本研究の落下運動に関していえば、被験者がアクセスできた動的情報とは、落下前後の速度の連続性であると推測される。落下前後に注目すると、直落の運動の場合、落下前にあった水平方向の速度が、落下直後には急に 0 になるので非連続となる。運動を動的に提示することにより、この非連続性が知覚されるため、直落は自然でない運動とみなされるのである。

また、動的提示の効果は、Kaiser, Proffitt & Anderson (1985) の実験と同様に、成人（大学生）だけでなく、子ども（小学生）においてもみられた。つまり、子どもにとっても、運動の動的情報が利用可能であったわけである。Kaiser, Proffitt & McCloskey (1985) の行った実験では、運ばれる条件での小学生 5, 6 年生の正答率は、21% にすぎなかった。しかし、本研究の実験 2 では、運ぶ問題の動的提示条件での正答率は 61% である。Kaiser, Proffitt & McCloskey (1985) の行った実験がいわゆる筆記型の課題でなく、実際に装置を見せるような現実的な課題であったにもかかわらず、正答率が低かったのは、運動の動的情報にアクセスできるような課題ではなかったからである。

発達的にみれば、直落信念に関して、運動の動的情報に対する知覚的感受性は、いつ頃から備わっているのだろうか。このことに関連して、Spelke の一連の研究がある (Spelke, 1991, 1994)。Spelke は、乳児が物体の運動に関するいくつかの物理的制約に敏感であることを明らかにした。選好注視や注視時間を指標として用いた実験から、3～4 カ月児でも、連続性（物体は連続して存在し、連続した軌跡の運動をする）や固体性（物体はそれぞれ別の空間を占有し、同時に同じ空間を占めることはできない）に対する感受性をもっていることが明らかにされた。しかし、重力や慣性に関する実験からは、一貫した結果は得られなかった。

本研究で取り上げた直落信念は、まさに重力と慣性に関連する課題である。Spelke によれば、重力や慣性は連続性や固体性ほど本質的な概念ではなく、発達の初期には獲得されない。つまり、これらの概念は、知覚や感覚運動的な経験を元に後になって獲得されるのである。このため、直落信念のような誤概念が生じる可能性があると考えられる。

本研究の第 2 の目的は、運動の軌跡と力の関係を明らかにし、直落信念の原因について検討することであった。そのため、実験 1 で力課題を行った。力課題では、先行研究で指摘されていた、運動方向に実際にはない力を記入するという誤概念が多くの被験者でみられた。この仮想的な力は、動いている力であると説明され、被験者の多くが MIF 概念を持っていることが明らかにされた。また、課題の後に軌跡について説明をさせたところ、力に基づく説明（“前に進もうとする力があるから” など）が、多くの被験者でみられた。このことから、素朴物理学においては、軌跡と力に強い結びつきがあることを推測される。

本研究からは、直落信念の直接の原因を明らかにすることはできないが、軌跡と力の関係については、MIF により、力が軌跡を予測するというのではなく、むしろ、被験者の説明に見られたように、MIF は軌跡を説明するために、実際にはない仮想的な力を創り出すという方向であるように思われる。

このような軌跡と力の概念の結びつきは、大学生のみに見られる現象である。小学生では、実験後の質問でどうしてそのような軌跡になるかを説明されると、力との関係で軌跡を説明する者

はほとんどなかった。これに対して、大学生では半数以上のものが力に基づく説明を行った。この差異は、実験手続き上の違い（大学生では力課題をおこなったが、小学生では行っていない）であるとも考えられるが、学校教育等で、力と運動について学ぶことで誤った概念を持つようになった可能性も否定できないであろう。

McCloskey は、直落信念の原因として錯視をあげている（McCloskey, Washburn & Felch, 1983）。本研究の結果は錯視説を直接否定するものではないが、直落信念の原因が知覚的なものである可能性は少ないといえよう。なぜなら、もし知覚的なものから直落信念が生じているとすれば、本研究でみられたような動的提示の効果は、知覚的な誤りのため、生じにくいはずである。むしろ、本研究の結果からは、直落信念は、知覚的な誤りでなく、概念的な誤りであるとみなした方がよいことを示している。

付 記

本稿は京都大学大学院教育学研究科に提出した修士論文（平成6年度）を加筆修正したものである。本稿の作成にあたって、御指導いただいた子安増生教授に感謝いたします。

文 献

- Caramazza, A., McCloskey, M., & Green, B. (1981). Naive beliefs in "sophisticated" subjects: Misconceptions about trajectories of objects. *Cognition*, 9, 117-123.
- Clement, J. (1982). Students' preconceptions in inductive mechanics. *American Journal of Physics*, 50, 66-71.
- Collins, A., & Gentner, D. (1987). How people construct mental models. D. Holland & N. Quinn (Eds.), *Cultural models in language and thought*. New York, NY: Cambridge University Press.
- de Kleer, J., & Brown, J. S. (1981). Mental models of physical mechanisms and their acquisition. In J. R. Anderson (Ed.), *Cognitive skills and their acquisition*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Forbus, K. D. (1983). Qualitative reasoning about space and motion. In D. Gentner, & A. L. Stevens (Eds.), *Mental models*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Gentner, D., & Gentner, D. R. (1983) Flowing water or teeming crowds: Mental models of electricity. In D. Gentner, & A. L. Stevens (Eds.), *Mental models*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Gentner, D., & Stevens, A. L. (1983). *Mental Models*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Green, B., McCloskey, M., & Caramazza, A. (1985). The relation of knowledge to problem solving, with examples from kinematics. In S. F. Chipman, J. W. Segal & R. Glaser (Eds.), *Thinking and learning skills. Vol. 2: Research and open questions*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Kaiser, M. K., Proffitt, D. R., & Anderson, K. (1985). Judgment of natural and anomalous trajectories of the presence and absence of motion. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 11, 795-803.
- Kaiser, M. K., Proffitt, D. R., & McCloskey, M. (1985). The development of beliefs about falling objects. *Perception & Psychophysics*, 38, 533-539.

- Kaiser, M. K., Proffitt, D. R., Whelan, S. M., & Hecht, H. (1992). Influence of animation on dynamical judgments. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 669-690.
- McCloskey, M. (1983). Naive theories of motion. In D. Gentner, & A. L. Stevens (Eds.), *Mental models* Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- McCloskey, M., Caramazza, A., & Green, B. (1980). Curvilinear motion in the absence of external forces: Naive beliefs about the motion of objects. *Science*, 210, 1139-1141.
- McCloskey, M., Washburn, A., & Felch, L. (1983). Intuitive physics: The straight-down belief and its origin. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 9, 636-649.
- Shanon, B. (1976). Aristotelianism, Newtonianism and the physics of the layman. *Perception*, 5, 241-243.
- Spelke, E. S. (1991). Physical knowledge in infancy: Reflections on Piaget's Theory. In S. Carey & R. Gelman (Eds.), *The epigenesis of mind: Essays on biology and cognition*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Spelke, E. S. (1994). Initial knowledge: Six suggestions. *Cognition*, 50, 431-445.
- Wiser, M., & Carey, S. (1983). When heat and temperature were one. In D. Gentner, & A. L. Stevens (Eds.), *Mental models*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

(博士後期課程3回生, 教育心理学講座)